

Title	Breakdown Characteristics in SiC and Improvement of PiN Diodes toward Ultrahigh-Voltage Applications( Abstract_要旨 )
Author(s)	Niwa, Hiroki
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2016-03-23
URL	<a href="https://doi.org/10.14989/doctor.k19722">https://doi.org/10.14989/doctor.k19722</a>
Right	許諾条件により本文は2017-03-23に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏 名	丹羽 弘樹
論文題目	Breakdown Characteristics in SiC and Improvement of PiN Diodes toward Ultrahigh-Voltage Applications (超高耐圧応用を目指した SiC における絶縁破壊特性の基礎研究および PiN ダイオードの高性能化)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、SiC（炭化珪素）パワーデバイスの高性能化を目指して、高電界におけるSiC半導体の絶縁破壊現象と超高耐圧SiCダイオードの高性能化に関する基礎研究をまとめたもので、5章からなる。</p> <p>第1章では、電力変換機器で用いられるパワー半導体デバイスの重要性とパワーデバイスに要求される性能を整理した後、SiC半導体の性質と高耐圧SiCバイポーラデバイスの有用性を述べている。特に、10 kV以上の超高電圧応用における電力変換用素子としてのSiCバイポーラデバイスの特徴、優位性を現行のSiパワーデバイスや現在開発中のSiCユニポーラデバイスと比較しながら論じている。次に、SiCバイポーラデバイスの研究開発の現状と研究課題を材料・デバイスの両方の観点で概説し、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、SiC半導体の絶縁破壊現象を決める基礎物性であるキャリアの衝突イオン化係数の重要性を述べた後、これを精密に決定する手法と注意点について議論している。次に、端部での電界集中をほぼ完全に抑制した様々な構造のpn接合ダイオードを作製し、深紫外光を照射したときの光生成電流のバイアス電圧依存性を解析することにより、電子および正孔の増倍係数の電界強度依存性を求め、次に独自に考案した解析手法を用いて電子および正孔の衝突イオン化係数の電界強度依存性を精密に決定している。低いドーピング密度を有するダイオードを用いて比較的低電界、高いドーピング密度を有するダイオードを用いて比較的高電界における衝突イオン化係数を求め、結果として約1~3 MV/cmの広い電界範囲で衝突イオン化係数を決定したことは特筆に値する。次に、作製したpn接合ダイオードの光生成電流のバイアス電圧依存性を室温から150℃の温度範囲で計測し、衝突イオン化係数の温度依存性も決定している。温度を上昇させるとフォノン散乱の影響を受けて正孔の衝突イオン化係数は減少するが、電子の衝突イオン化係数の温度依存性は非常に小さいことを見出している。電子の衝突イオン化係数に関するこの特異な温度依存性をSiC特有の伝導帯構造と関連付けて議論している。また、SiCでは他の半導体材料と異なり、移動度の低い正孔の衝突イオン化係数が移動度の高い電子より桁違いに大きいことを示し、この結果、デバイス応用上重要なp<sup>+</sup>n接合とn<sup>+</sup>p接合では耐圧に有意の差が生じる（p<sup>+</sup>n接合の方が高い耐圧が得られる）ことを見出している。最後に、決定した衝突イオン化係数を用いて様々な接合構造に対するイオン化積分の計算を行い、SiC半導体の絶縁破壊電界強度のドーピング密度依存性、およびその温度依存性を決定している。これにより、任意のSiCデバイスにおける正確な理論耐圧の計算および耐圧の温度依存性の予測が可能となることを示している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏 名	丹羽 弘樹
<p>第3章では、高耐圧SiCデバイス端部に設ける電界集中緩和構造の設計と超高耐圧SiC PiNダイオードの作製について述べている。まず、様々な構造を有するSiCダイオードを作製し、その耐圧がデバイス端部の構造に非常に敏感であり、この構造依存性がデバイスシミュレーションの予測と大きく乖離することを示している。次に、表面保護用酸化膜/SiC界面に存在する高密度の界面電荷をデバイスシミュレーションに導入することによって、上記の実験結果を定量的に再現できることを見出している。そこで、この界面電荷の問題を克服するために新しい電界集中緩和構造を考案し、その効果をシミュレーションと実験の両方により示している。次に、独自の手法で形成した高品質・高純度SiC結晶にこの電界集中緩和構造を適用し、PiNダイオードで26.9 kV以上という既存の半導体では実現できない最高の耐電圧を達成している。当該ダイオードは超高耐圧を有しながら、微分オン抵抗が10 mΩcm<sup>2</sup> 以下と極めて小さく、SiCバイポーラデバイスの高いポテンシャルを示している。</p> <p>第4章では、SiCバイポーラデバイスで問題となる低電流動作時の高いオン電圧（立ち上がり電圧）の低減を目指して、新規デバイス構造を提案している。具体的には、ダイオードに着目して、PiNダイオードにショットキー障壁ダイオードを並列に内蔵させ、低電流時にはユニポーラ動作（ショットキー障壁ダイオード）、高電流時にはバイポーラ動作（PiNダイオード）を主とするバイポーラ／ユニポーラのハイブリッド動作を活用することが有効であることを示している。次に、これをSiC半導体で実現するのに適した具体的なデバイス構造と作製プロセスを提案し、その特徴を既存のSiおよびSiCデバイスと対比させながら議論している。このデバイス特有の現象として観測される順方向バイアス時の電流不連続特性（スナップバック現象）の解明に取り組み、電流分布と接合の拡散電位を考慮した解析モデルとシミュレーションにより、この不連続特性を抑制するデバイス構造を明らかにしている。さらに、耐圧維持層の直列抵抗を低減する最適設計、高度なエピタキシャル成長とイオン注入技術による接合形成、漏れ電流を抑制する接合障壁構造の形成等の工夫を集積したメサ構造PiN／Tiショットキー障壁ダイオードを作製し、11 kVという超高耐圧を有するダイオードでバイポーラ／ユニポーラのハイブリッド動作を実証した。作製したダイオードは設計通りの高耐圧と低いオン電圧を示し、電流の不連続特性も観測されないことを示した。さらに、ダイオード特性の温度依存性を評価し、その変化を半導体物理に基づいて議論している。</p> <p>第5章は結論であり、本研究を通じて得られたSiC半導体における電子・正孔の衝突イオン化係数と絶縁破壊電界強度の決定、SiCパワーデバイス端部における電界集中を緩和する新規構造の提案と20 kV超級の耐圧達成、バイポーラ／ユニポーラのハイブリッド動作を活用した超高耐圧SiCダイオードの高性能化などの成果を整理して述べている。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究指針を提案している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、高耐圧・低損失パワー半導体デバイス用材料として有望な炭化珪素(SiC)における高電界物性の解明、絶縁破壊現象の解析と新しい電界集中緩和構造の提案、超高耐圧を有するダイオードの高性能化に関する基礎研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 高電界におけるSiC半導体の絶縁破壊現象を支配するキャリアの衝突イオン化係数を精密に決定する手法を明確にした後、様々な構造を有するpn接合ダイオードを作製し、深紫外光を照射したときの光生成電流のバイアス電圧依存性を解析することにより、SiCにおける電子および正孔の衝突イオン化係数の電界強度依存性を初めて精密に決定した。特に、約1~3 MV/cmの広い電界範囲、室温から150℃の温度範囲で衝突イオン化係数を決定し、これを元にSiC半導体の絶縁破壊電界強度のドーピング密度依存性を温度特性も含めて提示した成果は特筆に値する。これにより、SiCデバイスの耐電圧およびその温度依存性を精度よく予測することを可能とした。
2. 高耐圧SiCデバイス端部に生じる電界集中の緩和に関する研究を行い、SiCでは表面保護酸化膜/半導体界面に存在する高密度の界面電荷がデバイス端部近傍の電界分布を大きく乱すことを見出した。そこで、これを克服するために新しい電界集中緩和構造を考案し、その有効性をシミュレーションと実験の両方により示した。さらに、独自の手法で形成した高品質SiC結晶にこの電界集中緩和構造を適用し、PiNダイオードで26.9 kV以上という既存の半導体では実現できない最高の耐電圧を達成した。
3. SiCバイポーラデバイスで問題となる低電流動作時の高いオン電圧の低減を目指して新規デバイス構造を提案し、その有用性を実証した。具体的には、ダイオードを例にとり、PiNダイオードにショットキー障壁ダイオードを並列に内蔵させることが有効であることを示し、これを実現するのに適した具体的なデバイス構造と作製プロセスを提案した。このデバイス特有の現象である順方向バイアス時の電流不連続特性の解明に取り組み、電流分布と接合の拡散電位を考慮した解析モデルとシミュレーションにより、この不連続特性を抑制する構造を明らかにした。さらに、エピタキシャル成長とイオン注入を駆使して新構造を有する10 kV級ダイオードを作製し、超高耐圧と低いオン電圧を両立する優れた特性を得ることに成功した。

以上、要するに、本論文はSiC半導体における高電界下でのキャリアの衝突イオン化と絶縁破壊現象の解明、およびSiC特有の課題を克服する独自の電界集中緩和構造の提案を行い、これらの知見を集約して既存半導体の限界を大きく突破する超高耐圧・低損失SiCダイオードを実現したもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年2月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。